02

Особенности измерения теплового сопротивления микросборки мощных нитрид-галлиевых HEMT с кремниевым MOSFET, включенных по каскодной схеме

© В.И. Смирнов [1,2], В.А. Сергеев [1], А.А. Гавриков [1]

[1] Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия
[2] Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

e-mail: a.gavrikoff@gmail.com

Поступила в редакцию 07.05.2025 г.
В окончательной редакции 07.05.2025 г.
Принята к публикации 24.10.2025 г.

Исследованы теплоэлектрические процессы в GaN-транзисторах с каскодной структурой, состоящей из последовательно соединенных HEMT и MOSFET. Показана возможность определения сопротивления каналов HEMT и MOSFET по результатам измерения вольт-амперных характеристик каскодной структуры в различных режимах включения и приведены оценки тепловой мощности, рассеиваемой в обоих кристаллах. Компоненты теплового сопротивления транзистора определялись с помощью аппаратно-программного комплекса, реализующего модуляционный метод измерения с разогревом объекта импульсами греющего тока с широтно-импульсной модуляцией по гармоническому закону. Полученные значения компонент теплового сопротивления хорошо согласуются с паспортными данными транзистора.

Ключевые слова: нитрид-галлиевый транзистор, каскодная структура, HEMT, MOSFET, тепловое сопротивление, модуляционный метод, тепловое излучение.

DOI: 10.61011/OS.2025.10.61939.8037-25

Нитрид галлия (GaN), широко востребованный материал для создания мощных и СВЧ полупроводниковых приборов, обладает рядом уникальных свойств. Высокие значения скорости насыщения электронов и электрической прочности позволили создать на основе этого материала HEMT-транзисторы (HEMT — high electron mobility transistor) с рабочими частотами в десятки гигагерц и выходной мощностью в сотни ватт [1]. Большая рассеиваемая в этих транзисторах мощность определяет необходимость эффективного отвода тепла от активной области прибора. Количественной оценкой эффективности отвода тепла от активной области полупроводниковых приборов является тепловое сопротивление „переход–корпус“ R_{Tjc}, определяемое как отношение разности температур T_j $p-n$-перехода и T_c корпуса прибора к рассеиваемой в нем тепловой мощности [2]:

$$RT_{jc} = (T_j - T_c)/P,$$

где P — рассеиваемая в приборе мощность.

Тепловое сопротивление R_{Tjc} определяет предельно допустимую рассеиваемую мощность прибора — если рассеиваемая транзистором мощность превышает предельно допустимое значение, в транзисторной структуре возникает тепловой пробой. Реальные значения теплового сопротивления R_{Tjc} могут сильно отличаться от расчетных, поэтому этот параметр необходимо контролировать с достаточно высокой точностью. Большинство методов измерения теплового сопротивления основано на измерении переходной тепловой характеристики (ПТХ) [3]. При измерении ПТХ транзистор разогревается импульсами греющего тока I_{heat} с нарастающей по логарифмическому закону длительностью. Температура перехода T_j измеряется в паузах между импульсами с временной задержкой, необходимой для завершения переходных электрических процессов, происходящих при переключении транзистора из режима нагрева в режим измерения температуры, по изменению температурочувствительного параметра (ТЧП), в качестве которого для HEMT- и MOSFET-транзисторов (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), в частности, может быть использовано сопротивление канала RDS(on), линейно зависящее от температуры [4].

Структура HEMT с целью улучшения основных электрических, частотных и энергетических характеристик непрерывно совершенствуется. На начальном этапе своего развития HEMT были нормально открытые, т.е. при напряжении на затворе $U_{GS} = 0$ канал транзистора был открыт. Это создавало определенные неудобства разработчикам электронных средств с использованием мощных HEMT. Чтобы сделать их нормально закрытыми, в цепи затвора транзистора формируют дополнительный $p-n$-переход [5]. Альтернативным вариантом является создание каскодной структуры, в которой HEMT-транзистор объединяют с низковольтным кремниевым MOSFET-транзистором с низким сопро-

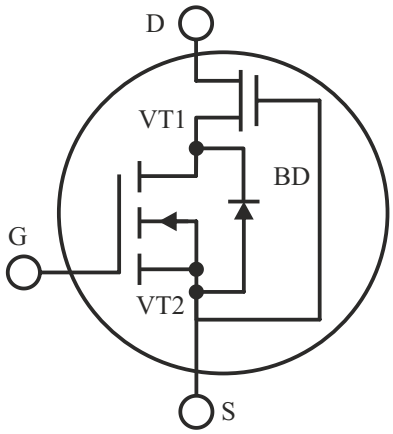

Рис. 1. Каскодная схема нитрид-галлиевого транзистора: VT1 — HEMT-транзистор; VT2 — кремниевый MOSFET-транзистор; BD — антипараллельный диод.

тивлением канала [6]. Управление HEMT-транзистором осуществляется напряжением на затворе MOSFET, а ток протекает последовательно через каналы HEMT и MOSFET. Это усложняет анализ теплоэлектрических процессов в такой двухкристальной системе, поскольку значения сопротивлений открытого канала $R_{\mathrm{DS(on)}}$ и их температурные коэффициенты для HEMT и MOSFET могут существенно различаться.

Объектом исследования являлся мощный нитрид-галлиевый транзистор NTP8G206N производства ON Semiconductor (рассеиваемая мощность $P_D = 96\,\mathrm{W}$, ток стока $I_{\mathrm{D}} = 17\,\mathrm{A}$, время задержки включения $t_{\mathrm{d(on)}} = 6.2\,\mathrm{ns}$, тепловое сопротивление $R_{Tjc} = 1.5\,\mathrm{K/W}$). Транзистор имеет каскодную структуру (рис. 1), включающую в себя собственно GaN HEMT (VT1) и низковольтный кремниевый MOSFET (VT2), исток которого соединен с затвором HEMT-транзистора, а исток последнего — со стоком MOSFET. Между истоком и стоком MOSFET-транзистора включен антипараллельный диод BD (body diode), который не влияет на работу транзистора в обычном режиме, но выполняет защитные функции при работе, например, на индуктивную нагрузку.

Транзисторы с каскодной структурой обычно содержат два кристалла: GaN-кристалл с HEMT и кристалл кремния с MOSFET и антипараллельным диодом. Иногда для улучшения характеристик транзистора вместо антипараллельного диода используют внешний быстродействующий карбид-кремниевый диод [7]. Кристаллы смонтированы в пластмассовом корпусе TO220, имеющем размеры $10 \times 16 \times 4.5\,\mathrm{mm}$. Для определения количества кристаллов и их места расположения в исследуемом транзисторе без вскрытия корпуса инфракрасным микроскопом PI 640 было измерено тепловое излучение транзистора (рис. 2).

Термограмма на рис. 2, *a* получена при пропускании импульса тока $I_{\mathrm{heat}} = 5\,\mathrm{A}$ длительностью $\tau = 300\,\mathrm{ms}$ от истока к стоку транзистора при напряжении на затворе $U_{\mathrm{GS}} = 0\,\mathrm{B}$, т. е. при закрытом канале MOSFET. Из профиля распределения температуры, показанного под термограммой, следует, что при протекании импульса тока через антипараллельный диод и канал HEMT оба кристалла нагреваются примерно одинаково, а третьего кристалла с карбид-кремниевым диодом в исследуемом объекте нет.

Термограмма на рис. 2, *b* получена при открытом канале MOSFET ($U_{\mathrm{GS}} = 6\,\mathrm{B}$) и импульсе тока $I_{\mathrm{heat}} = 10\,\mathrm{A}$ и $\tau = 100\,\mathrm{ms}$, протекающем от стока к истоку через последовательно соединенные каналы HEMT и MOSFET. В этом случае один из кристаллов нагревается заметно сильнее, что определяется различием сопротивлений каналов HEMT и MOSFET. Для корректного определения теплового сопротивления обоих кристаллов требуется знать электрические сопротивления обоих каналов.

Сопротивления канала HEMT можно определить на основе анализа вольт-амперной характеристики (ВАХ) транзистора при протекании тока от истока к стоку при закрытом канале MOSFET ($U_{\mathrm{GS}} = 0$). В этом случае ток протекает через антипараллельный диод и канал HEMT. Напряжение U_{SD} складывается из напряжения на $p{-}n$-переходе диода, которое для кремниевых диодов находится в диапазоне от 600 до 800 mV, и падения напряжения на канале HEMT. Вольт-амперная характеристика диода описывается формулой Шокли [8]

$$I = I_{\mathrm{S}}[\exp(qU/mkT) - 1], \tag{1}$$

где I_{S} — ток насыщения, m — коэффициент неидеальности $p{-}n$-перехода диода, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура перехода.

При $qU/kT > 8$ единицей в формуле (1) можно пренебречь, а $m \approx 1$ [8], и ВАХ диода в полулогарифмическом масштабе будет линейной:

$$\ln I = ln_{\mathrm{S}} + qU/kT. \tag{2}$$

Согласно паспорту, сопротивление канала транзистора NTP8G206N примерно равно 150 mΩ, и при протекании тока 100 mA падение напряжения на канале HEMT не превысит 15 mV, что существенно меньше падения напряжения на диоде. Поэтому при расчете линейной регрессии (2) (линия *1* на рис. 3) использовались точки ВАХ при $I < 60\,\mathrm{mA}$.

С увеличением тока вклад сопротивления канала HEMT в ВАХ транзистора возрастает, и для описания ВАХ транзистора в формуле (1) необходимо заменить напряжение U на $(U{-}Ir_{CH})$, где r_{CH} — сопротивление канала HEMT. Измеренная ВАХ транзистора с учетом падения напряжения на сопротивлении канала HEMT приведена на рис. 3 (кривая *2*). Из сравнения зависимостей *1* и *2* можно найти сопротивление канала HEMT. Так, при токе $I = 1000\,\mathrm{mA}$ разность падений напряжения на диоде и транзисторе составляет 105 mV (рис. 3), что соответствует сопротивлению канала HEMT $r_{\mathrm{CH}} = 105\,\mathrm{m\Omega}$.

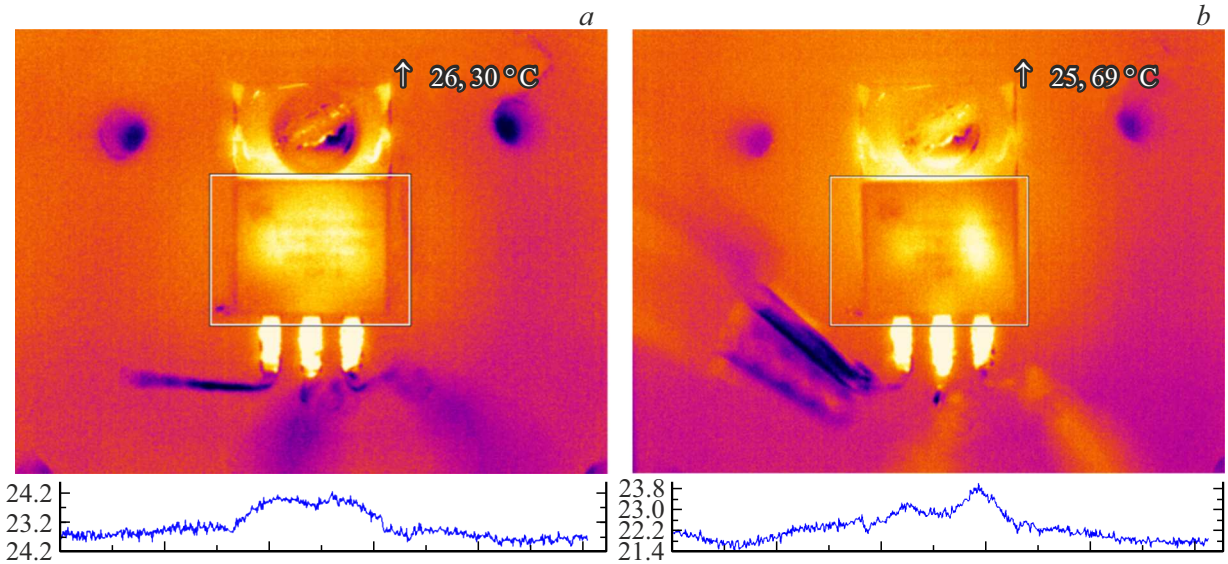

Рис. 2. Термограммы нагретых кристаллов транзистора NTP8G206N (внизу показаны профили распределения температуры вдоль оси, проходящей через центры кристаллов). В правом углу термограмм приведены максимальные значения температуры в поле измерения. Пояснения в тексте.

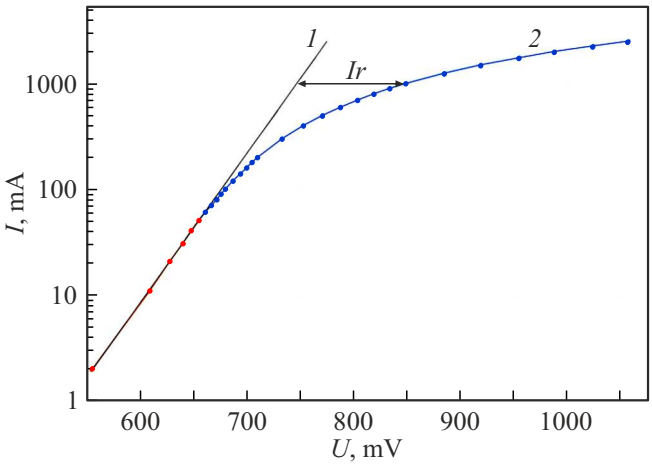

Рис. 3. Вольтамперная характеристика транзистора в полулогарифмическом масштабе: *1* — ВАХ диода, *2* — ВАХ с учетом падения напряжения на сопротивлении канала HEMT. Пояснения в тексте.

По результатам измерения ВАХ исследуемого транзистора при открытом MOSFET суммарное сопротивление каналов HEMT и MOSFET получилось равным 132 mΩ, откуда следует, что сопротивление r_{CH} канала MOSFET составляет 27 mΩ. Следовательно, при измерении теплового сопротивления транзистора необходимо учитывать, что около 20% выделяемой в транзисторе тепловой мощности рассеивается не в HEMT, а в MOSFET. Этот результат несколько отличается от результатов [9], согласно которым сопротивления каналов HEMT и MOSFET в каскодной структуре различаются на порядок.

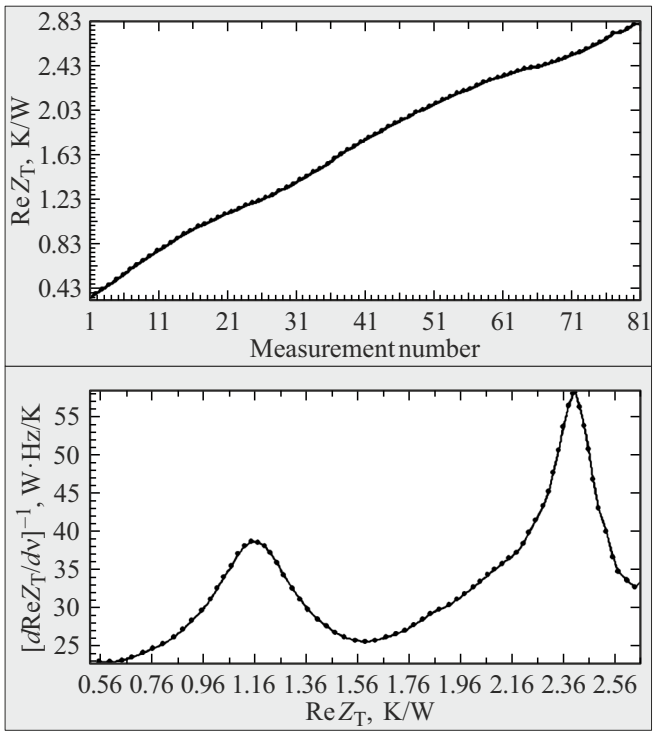

Рис. 4. Частотная зависимость вещественной части теплового импеданса (вверху) и результат ее обработки (внизу). Пояснения в тексте.

Измерение теплового сопротивления производилось модуляционным методом при нагреве объекта импульсами греющего тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ-импульсами) по гармоническому закону [10]. При пропускании через объект ШИМ-импульсов тока

в нем рассеивается переменная тепловая мощность $P(t)$ с амплитудой первой гармоники P_1, что вызывает колебания температуры перехода $T_j(t)$ с амплитудой первой гармоники T_{j1}, сдвинутой по фазе относительно гармоники мощности на угол φ. Отношение амплитуд T_{j1} и P_1 определяет модуль теплового импеданса Z_{T}, а отношение мнимой $\mathrm{Im}T_j$ и вещественной $\mathrm{Re}T_j$ фурье-компонент температуры перехода на частоте модуляции — тангенс фазы φ теплового импеданса:

$$Z_{\mathrm{T}} = T_{j1}/P_1; \qquad \mathrm{tg}\,\varphi = \mathrm{Im}T_j/\mathrm{Re}T_j.$$

На основе анализа зависимости вещественной части теплового импеданса $\mathrm{Re}Z_{\mathrm{T}}(\nu)$ от частоты модуляции греющей мощности можно определить компоненты теплового сопротивления всего пути, по которому распространяется тепловой поток от нагретого канала к корпусу и далее в радиатор. Наличие компонент теплового сопротивления на зависимости $\mathrm{Re}Z_{\mathrm{T}}(\nu)$ проявляется в виде пологих участков и точек перегиба, что может быть выявлено с помощью дифференцирования $\mathrm{Re}Z_{\mathrm{T}}(\nu)$ по частоте модуляции.

Измерение теплового сопротивления R_{Tjc} осуществлялось с помощью аппаратно-программного комплекса [11], реализующего модуляционный метод. Транзистор нагревался ШИМ-импульсами тока, протекающего от стока к истоку через каналы обоих транзисторов HEMT и MOSFET. Период следования импульсов составлял $500\,\mu$s. Модуляция длительности импульсов осуществлялась в диапазоне от 250 до $750\,\mu$s. В паузах между греющими импульсами с временной задержкой $80\,\mu$s измерялась температура T_j по изменению ТЧП, температурный коэффициент которого равен 0.1 mV/K. Измерения проводились при греющем токе 16 A. Измерение частотной зависимости теплового импеданса осуществлялось в диапазоне от 40 до 0.025 Hz с равномерным шагом по логарифмической шкале частот (20 точек на декаду). При вычислении теплового сопротивления кристалла HEMT учитывалась только тепловая мощность, рассеиваемая в этом кристалле. Результаты измерения зависимости вещественной части теплового импеданса $\mathrm{Re}Z_{\mathrm{T}}(\nu)$ от частоты модуляции греющей мощности представлены на верхней панели рис. 4. На нижней панели представлена зависимость $[d\mathrm{Re}Z_{\mathrm{T}}/d\nu]^{-1}$ от $\mathrm{Re}Z_T$. Положение максимумов относительно оси абсцисс определяет значения компонент теплового сопротивления. Первая компонента $R_{\mathrm{T1}} = 1.16$ K/W соответствует тепловому сопротивлению „переход–корпус„ HEMT-транзистора, что хорошо согласуется с паспортными данными, вторая компонента $R_{\mathrm{T2}} = 2.40$ K/W — тепловому сопротивлению „переход-радиатор“.

Приведенные в работе результаты показывают возможность оценки мощности, рассеиваемой каждым из кристаллов каскодной структуры, а также возможность применения модуляционного метода для измерения компонент теплового сопротивления таких транзисторов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] T.R. Lenka, P.T. Nguyen Hieu. *HEMT Technology and Applications* (Springer, Singapore, 2022). DOI: 10.1007/978-981-19-2165-0

[2] F. Oettinger, D. Blackburn. *Thermal resistance measurements* (Government Printing, U.S., 1990).

[3] M. Rencz, G. Farkas, A. Poppe. *Theory and Practice of Thermal Transient Testing of Electronic Components* (Springer, Switzerland, 2023). DOI: 10.1007/978-3-030-86174-2

[4] А. Строгонов, М. Харченко, А. Ханин. Электроника: Наука. Технология. Бизнес, **8**, 00229, 2023.

[5] X. Hu, G. Simin, J. Yang. Electron. Lett., **36** (8), 753 (2000). DOI: 10.1049/el:20000557

[6] X. Huang, W. Du, F.C. Lee, Q. Li, Z. Liu. IEEE Trans. Power Electron., **31** (1), 593 (2015). DOI: 10.1109/TPEL.2015.2398856

[7] C. Wu et al. Energies, **14** (12), 3477 (2021). DOI: 10.3390/en14123477

[8] S.M. Sze, M.K. Lee. *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley, 2006).

[9] G. Farkas, Z. Sarkany, M. Rencz. In: *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (Nuremberg, Germany, 2016), pp. 1-8. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7499411/metrics#metrics

[10] V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov, A.M. Shorin. Microelectronics Reliability, **80**, 205–212 (2018). DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.024

[11] V.I. Smirnov, A.A. Gavrikov. IEEE Trans. Instr. Measur., **73**, 1–9 (2024). DOI: 10.1109/TIM.2023.3345913